

Von der umströmten Scheibe zur optimierten Körperform

Prof. Dr.-Ing. habil. Karl Bühler

Fakultät Maschinenbau
und Verfahrenstechnik (M+V)

Badstraße 24
77652 Offenburg
Tel.: 0781 205-268
E-Mail: k.buehler@hs-offenburg.de

1948: Geboren in Achern

Lehre als Mechaniker

1971: Ing. (grad.) Ingenieurschule Offenburg

1975: Diplom Maschinenbau Universität Karlsruhe

1979: Promotion über Thermokonvektion

1985: Habilitation über Rotierende Strömungen,
Privatdozent Universität Karlsruhe

1986: Professor Universität Karlsruhe

Seit 1991: Professor an der Hochschule Offenburg

Seit 1994: Mitglied des Instituts für Angewandte Forschung (IAF)
der Hochschule Offenburg

1999, 2009: Forschungsaufenthalt an der University of Colorado at Boulder, USA

Zahlreiche Veröffentlichungen auf dem Gebiet der Thermo- und Fluidodynamik, darunter Strömungsmechanik (Springer 1991), Grundzüge der Strömungslehre (Vieweg + Teubner 2010), Hütte-Grundlagen der Ingenieurwissenschaften (Kap. Strömungsmechanik)

Forschungsgebiete: Strukturbildung in der Thermo- und Fluidodynamik,
Anwendungen der Computeralgebra, Numerische Strömungssimulation CFD



Prof. Dr.-Ing. Gerhard Kachel

Fakultät Maschinenbau
und Verfahrenstechnik (M+V)
Prodekan und Studiendekan
Maschinenbau (Bachelor)

Badstraße 24
77652 Offenburg
Tel.: 0781 205-167
E-Mail: gerhard.kachel@hs-offenburg.de

1962: Geboren in Heilbronn/Neckar, Studium Allgemeiner Maschinenbau, Universität Karlsruhe (TH), Schwerpunkte:

Technische Mechanik/Dynamik, Strömungslehre/Gasdynamik

1988: Diplom Maschinenbau, Universität Karlsruhe (TH),

Mitarbeiter der Daimler-Benz-AG, Stuttgart

Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau, Universität Karlsruhe (TH)

1997: Promotion zum Thema „Rechnerische Auslegung, Analyse und Optimierung einer mechanischen variablen Ventilsteuerung“, Fakultät für Maschinenbau, Universität Karlsruhe (TH), Robert Bosch GmbH, Bereich „Fahrdynamische Regelsysteme“, Aufgaben: Sicherheitsarchitektur, Funktions- und Software-Entwicklung, zuletzt funktionale Verantwortung für fahrdynamische Regelsysteme als System-Projektleiter für einen Großkunden.

Seit 2005: Professor an der Hochschule Offenburg in der Fakultät Maschinenbau und Verfahrenstechnik.

Seit 2009: Prodekan der Fakultät Maschinenbau und Verfahrenstechnik und Studiendekan des Bachelor-Studiengangs Maschinenbau

Lehrgebiete: Technische Mechanik, Finite Elemente Methode, Maschinenelemente

Forschungsgebiete: Numerische Strukturanalyse und -optimierung,
Numerische Strömungsoptimierung



3.7 Von der umströmten Scheibe zur optimierten Körperform

Prof. Dr.-Ing. habil. Karl Bühler
Prof. Dr.-Ing. Gerhard Kachel
M.Sc. Andreas Gottlieb

Abstract

Im Rahmen energieeffizienter Umströmungsprozesse sind Verfahren zur Entwicklung optimaler Körperformen notwendig. In einem Verbundforschungsvorhaben wird mit unterschiedlichen

Methoden an diesem Ziel gearbeitet. Ausgehend von der umströmten Scheibe wird eine optimalere Körperform durch Simulation ermittelt.

Einleitung

Zum Erreichen energieeffizienter Umströmungen von Körpern sind optimale strömungsgünstige Formen notwendig. Im Rahmen des Forschungsprojekts EudaF – Energieeffiziente Umströmungsprozesse durch automatisierte Formoptimierung [1] arbeiten die Autoren an der Weiterent-

wicklung von numerischen Lösungsverfahren, mit deren Hilfe solche optimalen Körperformen ermittelt werden sollen.

Referenzlösung

Ausgangspunkt ist die frontale Anströmung einer Kreisscheibe mit dem Durchmesser D und der Dicke s . Die numerisch ermittelte Strömungsform bei einer Anströmgeschwindigkeit mit $Re = u_\infty D / \nu = 32000$ in Luft ist in Abbildung 3.7-1 dargestellt. Links ist das Geschwindigkeitsfeld und rechts das Druckfeld zu sehen.

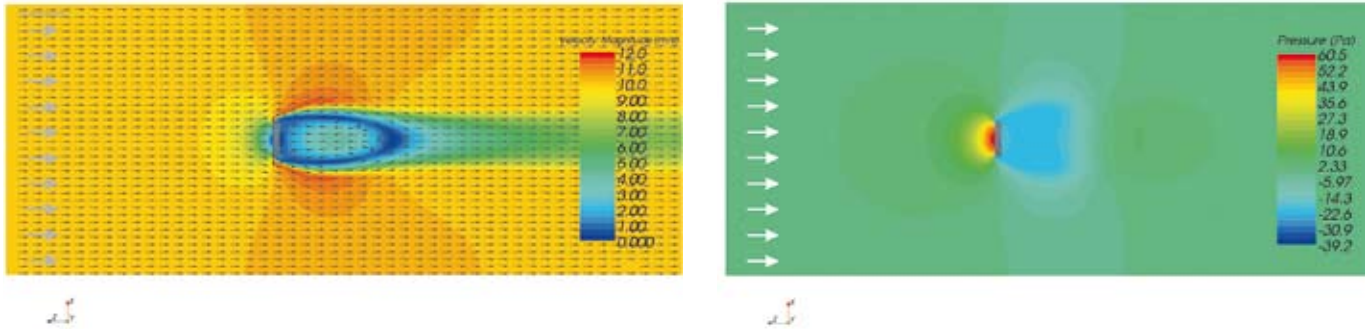


Abb. 3.7-1: Umströmung der Scheibe mit der Reynoldszahl $Re=33000$, links Geschwindigkeitsfeld mit dem Betrag in Farbe und rechts Druckfeld mit Betrag des Relativdrucks in Farbe

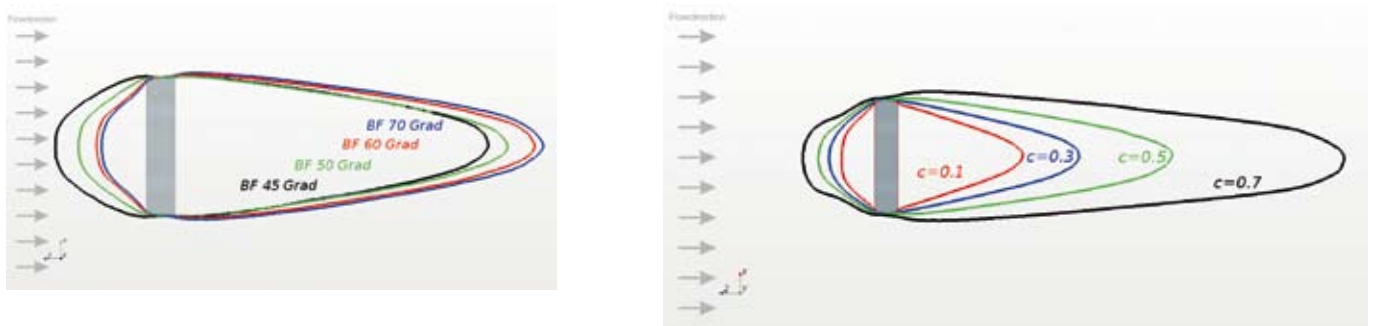


Abb. 3.7-2: Körperformen in Abhängigkeit der Parameterwerte von Tabelle 2, oben Cutoff- Wert $c=0,5$ und unten Backflow-Toleranz $BF=50$ Grad

Bei dieser Anströmung mit der Geschwindigkeit u_∞ bildet sich auf der Vorderseite ein Staupunkt aus, während sich auf der Rückseite durch die Ablösung der Strömung an der äußeren Hinterkante ein Rückströmungsgebiet ausbildet. Die Strömung ist turbulent. Das Stromfeld wurde unter Berücksichtigung des $k-\epsilon$ Turbulenzmodells berechnet. Die Daten der Scheibenumströmung sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

Die Strömung ist in Abbildung 3.7-1 oben mit lokalen Geschwindigkeitsvektoren visualisiert. Die Farbe entspricht dem Betrag der Geschwindigkeit, wobei blau niedrigen und rot hohen Geschwindigkeiten entsprechen. Das Rückströmungsgebiet wird mit einem stromab liegenden Staupunkt abgeschlossen.

| | | | |
|---------|------------|-------------------|-----------------------|
| Scheibe | D | m | 0,05 |
| | s | m | 0,01 |
| Luft | ρ | kg/m ³ | 1,18415 |
| | η | Pa.s | $18,55 \cdot 10^{-6}$ |
| | ν | m ² /s | $15,66 \cdot 10^{-6}$ |
| RB | u_∞ | m/s | 10 |

Tabelle 1: Daten von Scheibe und Fluid

Die Druckverteilung in Abbildung 3.7-1 unten zeigt, dass der hohe Druck vor der Scheibe und der niedrige Druck hinter der Scheibe zu einer nach rechts gerichteten Kraft auf die Scheibe führt, die als Druckwiderstand bezeichnet wird.

Optimierung

Mithilfe der Topologieoptimierung soll nun eine Bauteilform mit gleichem Durchmesser D gefunden werden.

Der Ansatz zur Ermittlung der optimalen Körperform basiert auf Kenntnissen über die nachteiligen Effekte von Rückströmungen, Wirbeln und „Totwasser“-Regionen auf den Druckabfall und andere

relevante Strömungsgrößen für geführte Strömungen. Die Anwendbarkeit des Verfahrens auf umströmte Körper wird im Folgenden anhand der Scheibe modellhaft aufgezeigt.

Dabei wird zunächst eine Referenzströmungsrichtung benötigt, die über eine verbesserte Simulation mit verschwindender Reynoldszahl $Re=u_\infty D/\nu=0$ ermittelt wird.

Simulation

Mit dem Simulationsprogramm TOSCA Fluid [2] wird nun die Sedimentierung der einzelnen Zellen berechnet.

| Körperform | BF | cutoff | $c_{w,p}$ | $c_{w,F}$ | c_w | $A \cdot c_w$ | Re |
|------------|------|--------|-----------|-----------|-------|----------------|-------|
| | Grad | — | — | — | — | m ² | — |
| a | 45 | 0.5 | 0.041 | 0.070 | 0.111 | 2.20E-04 | 31983 |
| b | 50 | 0.5 | 0.040 | 0.068 | 0.108 | 2.09E-04 | 31615 |
| c | 60 | 0.5 | 0.057 | 0.062 | 0.120 | 2.43E-04 | 32456 |
| d | 70 | 0.5 | 0.063 | 0.060 | 0.122 | 2.59E-04 | 33155 |
| f | 50 | 0.1 | 0.430 | 0.011 | 0.440 | 8.28E-04 | 31238 |
| g | 50 | 0.3 | 0.061 | 0.047 | 0.108 | 2.03E-04 | 31232 |
| h | 50 | 0.7 | 0.041 | 0.083 | 0.124 | 3.10E-04 | 35340 |
| Scheibe | | | 1.09 | -1.5E-4 | 1.09 | 21.4E-4 | 31916 |

Tabelle 2: Parameterwerte und Strömungsgrößen

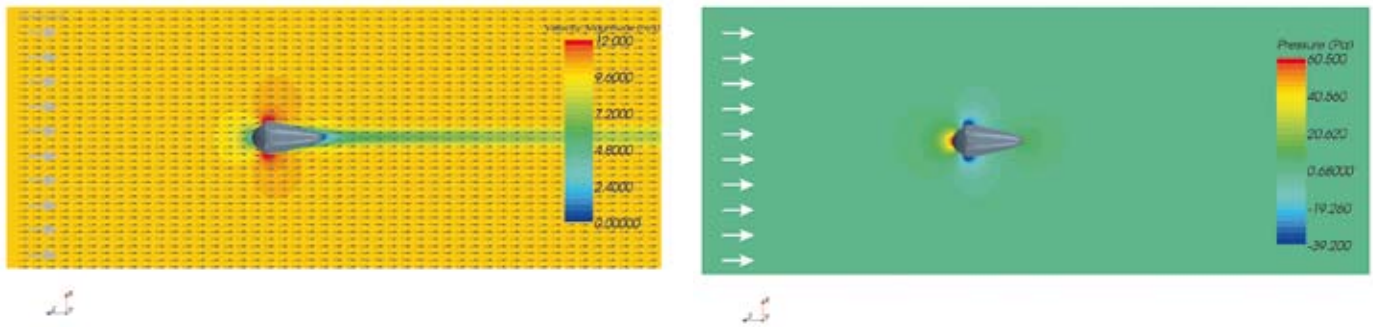


Abb. 3.7-3: Strömung um die optimierte Körperform mit dem Geschwindigkeitsfeld links und dem Druckfeld rechts

Nach jeder Iteration der Lösung der Strömungsgleichungen werden alle Zellen über einen Vergleich zwischen aktueller und zuvor berechneter Referenzströmrichtung überprüft, ob sie aus dem Strömungsgebiet heraus genommen werden sollen oder nicht. Zellen, die dem Optimierungskriterium nicht genügen, erhalten nach und nach einen höheren Sedimentationsgrad und werden nicht mehr durchströmt. Vom ursprünglichen Designgebiet (kompletter Windkanal ohne Scheibe) verbleibt so neben sedimentierten Bereichen ein unsedimentiertes, optimal durchströmtes Gebiet, das im Postprocessing noch extrahiert und geglättet werden muss. Zur Extraktion wurde das „Particle-Track Spread“-Verfahren verwendet. Hier wird für jede Zelle eine lokale Vergleichsgeschwindigkeit auf Basis von Partikelbahnen berechnet. Zur Extraktion einer Bauteiloberfläche wird die aktuelle Strömungsgeschwindigkeit in jeder Zelle mit der Vergleichsgeschwindigkeit verglichen. Über einen „Cutoff-Wert“ zwischen null und eins kann das Ausmaß der zum Designvorschlag heranzuziehenden Zellen gesteuert werden. Ein gewählter Cutoff-Wert von $c=0,5$ extrahiert beispielsweise alle Zellen, deren Geschwindigkeit mindestens 50 % der jeweiligen Vergleichsgeschwindigkeit beträgt.

Resultate

Durch Variation der Backflow-Toleranz ergeben sich die in Abbildung 3.7-2 oben dargestellten Körperformen. Abbildung 3.7-2 unten zeigt die Geometrievarianten, die bei konstanter Backflow-Toleranz von $BF=50$ Grad durch verschiedene Cutoff-Werte beim Postprocessing erzielt wurden.

Abbildung 3.7-2 oben zeigt die Körperformen, die mit einem konstanten Cutoff-Wert $c=0,5$ bei unterschiedlicher Backflow-Toleranz erzielt wurden.

In der Tabelle 2 sind die Parameterwerte und Strömungsgrößen für die verschiedenen erzielten Körperformen zusammengestellt. Die Körperformen b und g haben den geringsten Widerstandsbeiwert c_w , der sich aus Druck- und Reibungswiderstand zusammensetzt. Berücksichtigen wir das für den Gesamtwiderstand des Körpers wichtige Produkt aus $A \cdot c_w$, so schneidet die Körperform b am besten ab.

Die Abbildung 3.7-3 zeigt nun die berechnete Strömung um die optimierte Körperform g mit dem Geschwindigkeitsfeld oben und dem Druckfeld unten.

Die in Strömungsrichtung schlanker werdende Form lässt sich damit begründen, dass in Strömungen die Umsetzung von Druckenergie in kinetische Energie leichter möglich ist als die Umkehrung mit der Umwandlung von kinetischer Energie in Druckenergie.

Damit die Strömung immer der Wandkontur folgt und nicht ablöst, muss der Körper im Bereich der Verzögerung äußerst schlank sein.

Bauteile, mithilfe lokaler Optimalitätskriterien am Beispiel der umströmten Scheibe als Ausgangskörper hat gezeigt, dass bereits strömungsgünstige Formen gefunden werden können. Der erreichte c_w -Wert von $c_w=0.108$ liegt jedoch nicht im erreichbaren Bereich von Tragflügeln oder Stromlinienkörpern. Das Optimalitätskriterium der lokalen Rückströmungsvermeidung scheint hier nicht ausreichend zu sein, um optimale Bauteilformen zu generieren. Weitere Forschungsaktivitäten müssen deshalb hier ansetzen, um das Verfahren über andere oder zusätzliche Optimalitätskriterien zu erweitern und so auch für umströmte Körperformen anwendbar zu machen.

Diese ersten Resultate zeigen schon in Richtung des Ziels, weitere Strömungseigenschaften in die Optimierung mit einzubeziehen. Dies betrifft vor allem den Reibungseinfluss in Körpernähe durch die Schubspannungen und des makroskopischen Impulsaustauschs durch die Turbulenz.

Referenzen/References

- [1] EUdaF-Energieeffiziente Umströmungsprozesse durch automatisierte Formoptimierung. Verbundforschungsvorhaben der Hochschulen Offenburg und Karlsruhe 2009
- [2] TOSCA-Fluid: Software Product der Fa. FE-Design GmbH Karlsruhe: Rel.2.1.0, 2010
- [3] Bühler K., Kachel G., Karatas C.: Optimale Körperformen mit minimalem Strömungswiderstand IAF-FB HS OG S. 70 – 72 (2010)
- [4] Zierep J., Bühler K.: Grundzüge der Strömungslehre. 8. Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner 2010
- [5] Gottlieb A.: Anwendung der Topologieoptimierung für strömungsführende Bauteile im Fahrzeugentwicklungsprozess VDI-Tagungsband Simvec Baden-Baden 2010
- [6] Häußler, P., Bangert C.; Allinger P.: Innovative Produktentwicklung durch Struktur- und Strömungsoptimierung, SimPEP Kongress 14./15. Juni 2007 in Würzburg, FVA 2007
- [7] Klimetzek F. R.; Paterson J., Moos O.: AutoDuct: Topology Optimization for Fluid Flow, 1. Konferenz für angewandte Optimierung in der virtuellen Produktentwicklung, Karlsruhe, 21./22. März 2006